
1 Einleitung und Problemstellung

In den letzten Jahren hat eine rasante Entwicklung von Halbleiter-Bauelementen stattgefunden. Verbesserte Herstellungsmethoden, durch beständig gestiegenes physikalisches Wissen, ermöglichen die Produktion äußerst leistungsfähiger integrierter Schaltungen, ICs. Dies hat zur Folge, dass in fast allen technischen Geräten ICs zum Einsatz kommen. Die stetig gewachsene Anzahl an mobilen elektronischen Geräten verlangt von den ICs eine hohe Funktionalität bei geringem Energieverbrauch.

Zur Minimierung der Verlustleistung der ICs müssen die Strukturbreiten verkleinert werden [Klipstein 1997]. Seit den 60er Jahren haben sie sich nahezu alle 2 Jahre halbiert [Knapp 1997]. Dieser Trend wird sich auch in Zukunft weiter fortsetzen. Die Strukturbreiten heutiger Mikroprozessoren sind bereits bei $b_s=130$ nm angekommen [Intel 2002]. Sie sollen im Jahre 2003 die 100 nm-Grenze mit Strukturbreiten von $b_s=90$ nm unterschreiten [AMD 2002]. Im Jahre 2008 sollen die Strukturbreiten bei $b_s=70$ nm und im Jahre 2014 bei $b_s=35$ nm liegen [SIA 1999].

Zur Steigerung der Leistungsfähigkeit werden die Taktfrequenzen der ICs weiter steigen. So fand beispielsweise um die Jahrtausendwende ein Wettlauf um den ersten 1 GHz-Desktop-Prozessor zwischen Advanced Micro Devices (AMD) und Intel statt [Intel 1999, AMD 1999]. Heute ist bereits die 2 GHz-Grenze überschritten [Intel 2002], und im Labor wurden schon Transistoren für Prozessorfrequenzen von $f=10$ GHz auf Siliziumbasis demonstriert [Intel 2001]. Bei der Verwendung schnellerer III/V-Halbleiter sind bereits Frequenzen bis $f=3$ THz gezeigt worden [van der Weide 1993].

Um die Produktionskosten der Konsumgeräte zu senken, und gleichzeitig ihre Ausfallsicherheit und Funktionalität zu steigern, werden immer mehr Funktionen in einen Chip integriert, sogenannte „System on Chip“ [TSMC 2002, Long 2002, Chappell 2002, ChipPac 2002]. Dies hat einen enormen Anstieg der Komplexität der ICs zur Folge [SIA 1999]. Außerdem verkürzt sich trotz der gestiegenen Komplexität die Zeit eines Entwicklungszyklus von 36 Monaten im Jahre 1999 auf 32 Monate im Jahre 2002; im Jahre 2005 werden nur noch 30 Monate zur Verfügung stehen [SIA 1999].

Der hierdurch für die Hersteller entstehende Zeitdruck verlangt nach einer zeitoptimierten Entwicklung. Hierfür ist das schnelle Entdecken und Lokalisieren auftretender Fehler unerlässlich. Simulationen sind aufgrund teilweise nichtvorhandener Daten oder mangelndem Verständnis der Vorgänge nicht ausreichend [Sietmann 1995]. Messungen von außen sind bei

der Komplexität heutiger ICs wenig erfolgversprechend. Sie ermöglichen lediglich eine umfassende Funktionsanalyse; eine Fehlerlokalisierung kann dagegen in der Regel nicht durchgeführt werden. Ein schaltungsinterner Test an beliebigen Messpunkten innerhalb des ICs ist somit nicht nur wünschenswert, sondern notwendig [Marcus 1990, Courtois 1993].

Kontaktbehaftete, chipinterne Messtechniken werden aufgrund der steigenden Frequenzen und der sinkenden Strukturbreiten in Zukunft immer mehr an Bedeutung verlieren, da die Funktionsweise der ICs durch die Kontaktierung derart beeinflusst wird, dass aussagekräftige Messungen nicht möglich sind [Zimmer 1999]. Versuche, mit Hilfe von Rasterkraftmikroskopmesssonden eine Kontaktierung der kleinsten Leiterbahnen vorzunehmen, sogenanntes Picoprobng [Omicron 2000, Krieg 1999], befinden sich noch in der Entwicklung. Hierbei treten drei große Probleme auf:

- Das erste Problem ist die Kontaktierung derart kleiner Strukturen über einen längeren Zeitraum. Durch Drifteffekte in der Positioniereinrichtung kann die Position der Messsonden nicht gehalten werden.
- Eine weitere Schwierigkeit bei der Kontaktierung stellt das isolierende Oxid dar, das sich auf den zu untersuchenden Strukturen an Luft bildet.
- Das dritte große Problem liegt, wie bei allen kontaktierenden Messtechniken, in der Beeinflussung der Probe durch die angeschlossenen Messgeräte.

Für eine Strommessung muss außerdem die zu untersuchende Leiterbahn aufgetrennt werden, was in der Regel die Zerstörung des ICs bedeutet.

Zur Verifizierung der elektrischen Funktion benötigt man somit chipinterne, kontaktlose und damit zerstörungsfreie Messtechniken. Mit den vorhandenen Messtechniken hat man nur die Möglichkeit, Spannungen [Menzel 1983, Schöttler 1994, Fehr 1992] zu untersuchen. Zur Fehleranalyse ist jedoch die Kenntnis des fließenden Stroms erforderlich und wird zunehmend an Bedeutung gewinnen. Mit der Strommessung können verlustbehaftete Teilschaltungen innerhalb eines ICs entdeckt werden. Durch Veränderung dieser Teilschaltungen kann man so die Verlustleistung des ICs optimieren. Auch Kurzschlüsse und Leckströme innerhalb des ICs können mit Hilfe der Strommessung am schnellsten und effektivsten detektiert werden. Zur Strommessung an aktuellen Leiterbahnstrukturen von einer Breite unter $b_s=1\ \mu\text{m}$, mit Frequenzen im GHz-Bereich und bei Strömen $I < 1\ \text{mA}$ existiert zur Zeit kein Testsystem [Zimmer 1999]. Eine Befragung der Mitgliedsfirmen, der mit dieser Problematik befassten Fachgruppe „Kontaktloses Testen elektronischer

Bauelemente“ der Informationstechnischen Gesellschaft (ITG) des Verein Deutscher Ingenieure (VDI) ergab, dass die Entwicklung eines entsprechenden kontaktlosen Strommessverfahrens zur Zeit Priorität besitzt. So wird derzeit z.B. ein vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) gefördertes Projekt: „Neue Methoden zur Mikrocharakterisierung von Halbleiterbauelementen“ an der Gerhard-Mercator-Universität Duisburg in Zusammenarbeit mit der Infineon Technologie AG München durchgeführt.

Aufgrund der oben beschriebenen Tendenzen in der Halbleitertechnologie lassen sich einige Anforderungen an ein kontaktloses, IC-internes Strommessverfahren ableiten. Eine Gleichstrommesstechnik, die einige μA nachweisen kann, ist zur Untersuchung komplexer ICs erforderlich. Außerdem muss ein Strommessgerät, das in der Funktions- und Fehleranalyse eingesetzt werden soll, eine Möglichkeit aufweisen, hochfrequente Ströme im GHz-Bereich zu detektieren. Ein solches Testsystem sollte, um auch an den in der Zukunft stetig kleiner werdenden Leiterbahnen messen zu können, eine Ortsauflösung von $A_0 < 100 \text{ nm}$ besitzen.

Da der Stromfluss nicht direkt gemessen werden kann, hat man die Möglichkeit, über unterschiedliche physikalische Größen Rückschlüsse auf den Strom zu ziehen. Am sinnvollsten erscheint die Messung des durch den Stromfluss hervorgerufenen Magnetfeldes. Aber auch die durch den Stromfluss erzeugte Wärme, oder die durch externe Wärmeeinwirkung bedingte Widerstandsänderung in der Leiterbahn kann zur Auswertung herangezogen werden.

Eine sehr unpräzise, aber leicht zu handhabende und daher oft eingesetzte Messtechnik zur Entdeckung von Kurzschlussströmen ist die Liquid-Crystal-Testing-Technik [Blinov 1983, Picart 1990]. Bei dieser Technik können erwärmte Bereiche, zum Beispiel durch den erhöhten Stromfluss infolge eines Kurzschlusses hervorgerufen, in einem IC erkannt werden. Dabei ist die Ortsauflösung A_0 mit einigen $10 \mu\text{m}$ sehr schlecht.

Mit dem Elektronenstrahl-Tester (E-Beam) [Helmreich 1992], der heute zur kontaktlosen IC-internen Analyse elektrischer Spannungen eingesetzt wird, kann man über die Ablenkung der Sekundärelektronen das durch einen in der Leiterbahn fließenden Strom generierte Magnetfeld messen. Diese Messtechnik erreicht aber nur Stromauflösungen von $\Delta I_0 > 100 \text{ nA}$ und ist somit für die Analyse heutiger integrierter Schaltungen unbrauchbar.

Eine weitere Strommesstechnik bietet ein auf dem SQUID-Effekt (eng. Scanning Quantum Interference Device) basierendes Messsystem [Vanderlinde 2000]. Hierbei wird der SQUID-

Sensor zur Auswertung des durch den Stromfluss erzeugten Magnetfeldes verwendet. Um extrem kleine Magnetfelder messen zu können, muss sich der Sensor im Ultrahochvakuum und unter extrem tiefen Temperaturen befinden. Der große Nachteil des Messsystems liegt in der geringen Ortsauflösung von ca. $A_0=16 \mu\text{m}$. Dies ist dadurch bedingt, dass der Sensor aufgrund der Vakuumkammer nur in sehr großem Abstand von $h>10 \mu\text{m}$ an die Probe herangeführt werden kann. Somit ist dieses Gerät für die IC-interne Strommessung, mit Ausnahme einiger Spezialfälle, ebenfalls ungeeignet.

Eine andere Möglichkeit Ströme zu messen, jedoch nur einzelne Spezialfälle, ist das OBIRCH-System (eng. Optical Beam Induced Resistance Change). Es basiert auf der Widerstandsänderung einer Leiterbahn bei Erwärmung [Nikawa 2000]. Hierbei wird ein Laserstrahl über die Probe rasterförmig geführt, und mit Hilfe eines sehr empfindlichen Strommessgerätes wird die dabei auftretende Stromänderung an einem Ausgang des ICs gemessen. Somit können in Einzelfällen Kurzschlüsse entdeckt werden. IC-interne Messungen im Betrieb des ICs sind dagegen nicht möglich. Strommessungen an Leiterbahnen ohne Kontakt nach außen sind hiermit auch nicht durchführbar.

Andere Strommessverfahren basieren auf magnetooptischen Effekten, wie dem Kerr- [Pretorius 1997] oder Faradayeffekt [Elezzabi 1996], haben aber die Problematik der begrenzten Ortsauflösung, wie das elektrooptische Testen [Mertin 1994]. Abhilfe könnte hier das SNOM (eng. Scanning Near-Field Optical Microscopy) [Pohl 1995] schaffen, bei dem durch die Anwendung einer sehr scharfen Glasfaserspitze auch Messungen mit höherer Ortsauflösung möglich werden [Nikawa 1998]. Jedoch mangelt es derzeit an fundierten Erkenntnissen bezüglich der Strommessung, die eine Beurteilung dieser Testtechnik erlauben.

Die Vermessung des in der Leiterbahn fließenden Stroms durch Auswertung elektromagnetisch abgestrahlter Wellen mit Hilfe von Feldsonden in Form von Antennen ist nur für sehr hohe Arbeitsfrequenzen möglich. Niederfrequente- oder Gleichstrommessungen sind hiermit ausgeschlossen [Budka 1995, Gao 1997].

Die Auswertung des vom Stromfluss erzeugten Magnetfeldes mit Hilfe von Hall-Sonden zeigte eine Ortsauflösung von $A_0=1 \mu\text{m}$ bei $I=1 \text{ mA}$ Stromfluss [Oral 1996]. In wieweit die Hall-Sonden hochfrequenztauglich sind, kann derzeit nicht gesagt werden. Außerdem stellt die Miniaturisierung dieser Sonden technologisch einige Probleme dar. Ob diese in der näheren Zukunft schneller zu lösen sind, als die Strukturbreiten der zu untersuchenden ICs sinken, ist fraglich.

Das o.g. Problem der Miniaturisierung verhindert auch den Einsatz sogenannter Fluxgate-Sensoren [Wende 1999]. Diese bestehen aus einer Halbleiterspule und können über Verstimmungen der Resonanzfrequenz infolge des auf sie wirkenden Magnetfeldes diese Magnetfelder sehr präzise vermessen. Ihre Miniaturisierung ist allerdings vollständig an die Entwicklung der Halbleiterindustrie gekoppelt, so dass sie niemals kleiner werden können als die zu untersuchenden Leiterbahngeometrien. Die erforderliche Ortsauflösung von unter $A_0=100$ nm ist somit derzeit ausgeschlossen [Wende 1999].

Eine sehr vielversprechende Alternative stellt die Vermessung der durch den Stromfluss generierten Magnetfelder mit Hilfe der XMR-Sensoren [van den Berg 1996, Mattheis 1999] dar. Hierbei wird der in den 80er Jahren entdeckte magneto-resistive Effekt ausgenutzt. Die XMR-Sensoren werden zur Zeit überwiegend in Festplattenköpfen eingesetzt. Mit ihnen konnten bereits Stromauflösungen von $\Delta I_0=10$ μ A [Bae 1998, Bae 2001], Ortsauflösungen von $A_0=2$ μ m und Frequenzen bis $f=2$ MHz gezeigt werden [Bae 2000]. Das größte Problem dieser Messtechnik besteht darin, geeignete Sensoren herzustellen. Aufgrund der zu erwartenden hohen Entwicklungskosten ist zur Zeit nicht mit einer schnellen Realisierung zu rechnen.

Eine noch vielversprechendere Alternative wurde bereits 1994 vorgestellt. Hierbei wird eine Variante des Rasterkraftmikroskops, das Magnetkraftmikroskop (MKM) [Campbell 1994], zur Untersuchung der durch den Stromfluss erzeugten Magnetfelder verwendet. Das MKM rastert eine sehr feine magnetische Messspitze in einem sehr geringen Abstand ($h=50$ nm bis $h=100$ nm) über die Probenoberfläche und misst die durch die Magnetfelder hervorgerufenen Kräfte [Sarid 1991]. Somit bietet das MKM mit einer maximalen Ortsauflösung von derzeit $A_0=0$ nm [Grütter 1990] beste Voraussetzungen, sich als Testtool für die Strommessung in der Halbleiterindustrie zu etablieren.

Zur Beschreibung der Kraftwechselwirkungen beim MKM dient das Dipolmodell [Hartmann 1989], in dem man die magnetische Messspitze als einen einzelnen magnetischen Dipol annimmt. Zur Strommessung wurden Messspitzen aus Silizium verwendet, die durch Eintauchen in eine Schmelze aus einer Eisenlegierung (NdFeB) als magnetischer Sensor [Campbell 1994] brauchbar gemacht wurden. Damals zeigte sich, dass Standard-Messspitzen mit einem aufgedampften magnetischen Film, wie sie üblicherweise für das MKM verwendet werden, für die Strommessung nicht geeignet sind. Unter diesen Voraussetzungen konnten an Leiterbahnen der Breite $b_L=2$ μ m Gleichströme von $I=1$ mA und niederfrequente

Wechselströme von $I=1\ \mu\text{A}$ gemessen werden [Campbell 1994]. Hochfrequente Messungen sind mit diesen Messsonden ausgeschlossen.

Eine kritische Betrachtung der Theorie des MKM zeigt dagegen mehrere, im Dipolmodell vernachlässigte Einflüsse. So wird in dem Dipolmodell [Hartmann 1989] die gesamte Magnetisierung der Messspitze als ein konstanter magnetischer Dipol angenommen. Bei genauer Betrachtung stellt man jedoch fest, dass die Größe des Dipols nicht unabhängig von der Größe des außen anliegenden magnetischen Feldes sein kann [Sueoka 1991]. Die daraus resultierenden nichtlinearen Effekte begründen die Hoffnung, dass es mit Standard-Messsonden möglich sein wird, hochfrequente Ströme zu messen. Im Verlauf der Arbeit bestätigten auch anderen Gruppen diese These durch hochfrequente Magnetfeldmessungen [Proksch 1999]. Des Weiteren geht das Modell nur von einem einzigen Dipol aus, der sich im unteren Bereich der Messspitze befindet. Da jedoch die gesamte Hebelarmunterseite mit einem magnetischen Material bedampft ist, kann man auch hier davon ausgehen, dass weitere Modellanpassungen erforderlich sind.

Im Rahmen dieser Arbeit wird deshalb ein Messsystem, basierend auf der Magnetkraftmikroskopie, entwickelt. Mit ihm soll es möglich sein, Ströme in integrierten Halbleiterbauelementen kontaktlos zu bestimmen. Außerdem findet eine Anpassung der bestehenden Theorie zur Beschreibung der Wechselwirkungen des MKM an die Bedürfnisse der Strommessung mit dem MKM statt. Schwerpunkt soll vor allem die Verbesserung der bisher erzielten Leistungsparameter sein, sowie die Evaluierung des Systems für die Messung hochfrequenter Ströme. Zunächst findet eine kritische Analyse eines existierenden Rasterkraftmikroskop-Testsystems, das für die Anwendung von XMR-Sensoren konzipiert war [Bae 1999], statt. Daran schließt sich die Weiterentwicklung des Systems für den Einsatz zur Funktions- und Fehleranalyse in integrierten Schaltungen an. Aufgrund der Abgeschlossenheit dieses Messsystems folgt, basierend auf den Erfahrungen, die Neukonstruktion eines, speziell auf die Belange der Strommessung ausgerichteten, optimierten Messsystems. Dabei werden das gleiche physikalische Prinzip und die gleichen Messsonden zur Anwendung kommen, so dass die Messergebnisse übertragbar sind. Mit der Charakterisierung der Messtechnik an sich kann parallel zum Aufbau des neuen Gerätes begonnen werden.

Bei der Konstruktion des neuen Gerätes ist auf größtmögliche Modularität, sowie auf freien Zugang zu allen eingesetzten Programmquellcodes zu achten. Hierdurch soll die Möglichkeit

gewahrt bleiben, auf zukünftige Entwicklungen, wie sie zum Beispiel der Nadelsensor [Bartzke 1993] darstellt, reagieren zu können.

Zur Lösung der Aufgaben beinhaltet Kap. 2 die Vorstellung der physikalischen und apparativen Grundlagen eines Rasterkraftmikroskops und der Strommesstechnik. Außerdem wird der Stand der Technik diskutiert.

In Kap. 3 folgt die Beschreibung der beiden im Rahmen der Arbeit realisierten Messsysteme. Zunächst werden kurz die notwendigen Modifikationen an dem bestehenden Messaufbau erläutert, die Schwächen im Anschluss diskutiert, und anhand derer die Neukonstruktion vorgestellt.

In Kap. 4 schließt sich die Evaluation einiger, zur Zeit kommerziell verfügbarer und prinzipiell geeigneter Messsonden an.

In den beiden darauf folgenden Kapiteln 5 und 6 ist die in dieser Arbeit neu entwickelte Gleichstrommesstechnik, sowie erstmals eine hier neuentwickelte Hochfrequenzmesstechnik dargestellt.

Kap. 7 stellt Einflüsse auf die neuentwickelte Strommesstechnik vor. Es werden neben den, gemäß dem vorgestellten Dipolmodell erwarteten Parametern auch einige andere Störeinflüsse untersucht. Es folgt ihre theoretische Erklärung anhand von Modellerweiterungen und die Entwicklung von Lösungen zu deren Eliminierung.

In Kap. 8 schließt sich die Charakterisierung des entwickelten Messsystems, sowie der Vergleich zwischen den zu erwartenden Testcharakteristika und den messtechnisch erreichten Werten an.

Kap. 9 zeigt eine Fehleranalyse an einem realen Problem.

Da beiden Messsystemen eine neue Messtechnik zugrunde liegt, und es sich bei beiden Geräten um Neuentwicklungen handelt, steht außer Frage, dass sich weitere Untersuchungen und Entwicklungen an diese Arbeit anschließen müssen. Diese werden im Ausblick in Kap. 10 vorgestellt, bevor in Kap. 11 die erzielten Ergebnisse der Arbeit noch einmal zusammenfassend dargestellt sind.